

0 72493 0-1

На правах рукописи

**ХАСАНОВ Рубис Раисович**

**ПРОЧНОСТЬ И ВЫНОСЛИВОСТЬ ПЛОСКИХ КОНТАКТНЫХ ШВОВ  
СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ  
И ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Казань 2001

Работа выполнена на кафедрах “Строительная механика” и “Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология” Казанской государственной архитектурно-строительной академии.

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| Научный руководитель  | – советник РААСН, доктор технических наук,<br>профессор<br><b>Мирсаяпов Илизар Талгатович</b>   |
| Официальные оппоненты | – член корреспондент РААСН,<br>доктор технических наук, профессор<br><b>Колчунов Виталий Иванович</b><br>– кандидат технических наук, доцент<br><b>Замалиев Фарит Сахапович</b> |
| Ведущая организация   | – научно-производственная фирма<br>“Татинвестгражданпроект” кабинета<br>министров Республики Татарстан  |

Защита состоится 25 декабря 2001 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета К 212.077.01 по присуждению ученой степени кандидата технических наук при Казанской государственной архитектурно-строительной академии по адресу: г.Казань, ул. Зеленая, 1, ауд. Б-122.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Казанской государственной архитектурно-строительной академии.

Совет направляет Вам для ознакомления данный реферат и просит Ваши отзывы и замечания в двух экземплярах, заверенные печатью, направлять по адресу: 420043, г.Казань, ул.Зеленая, 1, Казанская государственная архитектурно-строительная академия.

Автореферат разослан 15 ноября 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

 А.М.Сулейманов



07249307

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

**Актуальность темы.** В современном строительстве появляется все больше новых строительных материалов, однако, несмотря на это, железобетон все же остается основным конструкционным материалом, поэтому имеет большое значение повышение эффективности его применения. Достижение этой цели требует непрерывного совершенствования методов расчета конструкций, способствующих их надежному и экономичному проектированию.

Одним из путей снижения стоимости и трудоемкости строительства, экономии материалов является применение сборно-монолитных конструкций, сочетающих в себе основные положительные качества, как сборного, так и монолитного железобетона.

Одной из основных задач при проектировании, изготовлении и эксплуатации сборно-монолитных конструкций является обеспечение совместной работы составляющих конструкцию двух разнородных бетонов.

Существующие методы расчета прочности и деформативности контактных швов, как правило, основаны на использовании эмпирических коэффициентов, полученных на основании экспериментальных исследований и учитывающих те или иные особенности железобетонных конструкций, и не в полной мере отражают реальное напряженно-деформированное состояние, как контактного шва, так и конструкции в целом, что сужает диапазон рассчитываемых конструкций. К тому же такой подход не всегда дает надежные и одновременно экономичные решения.

Несмотря на большое количество исследований, все еще не существует единого подхода к оценке несущей способности контактных швов и единого критерия достижения предельного состояния, а расчетный аппарат распространяется, в основном, на статическое нагружение.

Во многих случаях железобетонные конструкции при эксплуатации испытывают наряду со статическим нагружением также и многократно повторяющиеся динамические воздействия. К числу источников, вызывающих динамические нагрузки, относятся многие производственные агрегаты, транспортные средства и т.п. При этом в зависимости от параметров внешней нагрузки и времени ее действия разрушение наступает при напряжениях значительно меньших статически разрушающих. Задача определения выносливости требует знания тех пределов на-

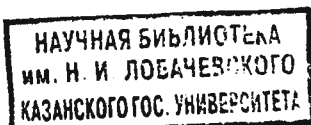
пряжений, которые тот или иной материал может выдержать без разрушения.

Вопрос обеспечения совместной работы составляющих бетонов сборно-монолитных конструкций при циклическом нагружении является малоизученным. В действующих нормах проектирования расчет выносливости контакта производится как при статическом нагружении, путем уменьшения расчетных сопротивлений материалов. Поэтому возникает необходимость в разработке новых усовершенствованных методов расчета прочности и выносливости контактных швов, наиболее правильно отражающих работу контактного шва и сборно-монолитной конструкции в целом при статических и циклических нагружениях.

**Цель и задачи исследований.** Целью диссертационной работы является разработка новых методов расчета прочности и выносливости контактных швов сборно-монолитных железобетонных изгибаемых элементов в зоне действия изгибающих моментов и поперечных сил с учетом реального напряженно-деформированного состояния конструкции при статическом и циклическом нагружениях.

В связи с этим в работе поставлены следующие задачи:

- анализ результатов существующих экспериментальных исследований прочности и выносливости контактных швов сборно-монолитных железобетонных элементов, выявление основных закономерностей статического и усталостного разрушения, развития деформаций и напряжений в бетоне и арматуре контактного шва;
- провести теоретические исследования напряженно-деформированного состояния контактных швов сборно-монолитных железобетонных элементов при статическом и циклическом нагружениях;
- разработать новые методы расчета прочности и выносливости контактных швов сборно-монолитных железобетонных элементов, наиболее полно учитывающие напряженно-деформированное состояние элемента;
- оценка точности предлагаемых методов расчета прочности и выносливости контактных швов сборно-монолитных конструкций путем сравнения теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными разными исследователями.



**Автор защищает:**

- результаты теоретических исследований по определению напряженно- деформированного состояния во всех компонентах контактного шва при статическом и циклическом нагружениях;
- метод расчета несущей способности контактного шва при статическом нагружении с учетом реальных условий деформирования арматуры, пересекающей контактный шов, и бетона под ней;
- метод расчета выносливости контактного шва при циклическом нагружении с учетом реальных условий деформирования поперечной арматуры и бетона;
- метод расчета выносливости контактных швов изгибаемых сборно-монолитных элементов при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил, с учетом одновременного изменения напряженно-деформированного состояния компонентов наклонного сечения и контактного шва, прочностных и деформативных свойств материалов в составе конструкции, а также с учетом неравномерности распределения усилий сдвига по контакту и податливости сопряжения;
- результаты проверки точности и надежности предлагаемых методов расчета прочности и выносливости контактных швов сборно-монолитных конструкций различными экспериментальными данными.

**Научную новизну работы представляют:**

- общие уравнения механического состояния бетона под поперечной арматурой, пересекающей контактный шов, с учетом неупругих свойств бетона, реальных режимов деформирования материалов в составе конструкции при статических и циклических нагружениях;
- расчетные зависимости для определения переменного коэффициента постели бетонного основания под поперечной арматурой контактного шва для учета физической нелинейности деформирования бетона;
- расчетные зависимости для определения напряжений в бетоне и арматуре контактного шва в зависимости от деформаций смятия бетона;
- метод расчета несущей способности контактных швов сборно-монолитных железобетонных конструкций при статическом нагружении, наиболее полно учитывающий напряженно-деформированное состояние контакта;

- метод расчета выносливости контактных швов сборно-монолитных железобетонных изгибаемых элементов при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил на основе аналитических диаграмм деформирования материалов с учетом одновременного изменения напряженно-деформированного состояния компонентов наклонного сечения и контактного шва, физико-механических свойств и режимов деформирования материалов в составе конструкций при циклических нагружениях, а также с учетом неравномерности распределения усилий сдвига по длине шва и податливости сопряжения;
- расчетные зависимости для определения начальных и остаточных напряжений в пересекающей контакт поперечной арматуре и бетоне под ней.

**Практическое значение работы** заключается в том, что в результате проведенных исследований разработаны методы расчета прочности и выносливости неармированных и армированных плоских контактных швов сборно-монолитных конструкций, наиболее полно учитывающие напряженно-деформированное состояние контактного шва и приопорного узла при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил; учитывающие реальные условия деформирования арматуры и бетона контактного шва при сдвиге под действием статических и циклических нагрузок, влияние податливости соединения сборного и монолитного частей на величину сдвигающего усилия по контакту и неравномерность распределения погонных сдвигающих усилий по длине шва, позволяющие повысить надежность результатов расчета, а в ряде случаев - расчетную несущую способность, и за счет этого получить наиболее экономичные их конструктивные решения.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях КГАСА, на Российском научно-практическом семинаре: "Проблемы реконструкции и возрождения исторических городов" и на Всероссийских академических чтениях: "Строительные конструкции. Состояние и перспективы развития".

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 4 печатные работы

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка использованной литературы.

Общий объем работы составляет 190 страниц, в том числе – 125 страниц машинописного текста, 71 рисунок, 8 таблиц и список использованной литературы из 148 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В процессе изготовления сборно-монолитных конструкций при укладке монолитного бетона образуется шов сопряжения нового бетона со старым, называемое контактным швом, который представляет собой ослабленное сечение. В изгибаемых элементах под действием внешних нагрузок в нормальном и наклонном сечениях элемента создаются взаимопротивоположно направленные продольные усилия, а контактный шов, находящийся между ними, испытывает при этом сдвигающие усилия, которые могут нарушить его сплошность, что приводит к уменьшению несущей способности конструкции в целом и ее разрушению. Таким образом, напряженно-деформированное состояние и прочность сборно-монолитных конструкций, наряду с прочностными и деформативными характеристиками материалов и компоновки сечений, существенно зависит и от прочности соединения между сборным и монолитным бетонами. Поэтому одной из главных задач при проектировании, изготовлении и эксплуатации таких конструкций является обеспечение совместной работы двух разнородных бетонов.

Исследованию прочности и деформативности контактных швов сборно-монолитных конструкций посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, таких как, А.А.Гвоздев, Б.Л.Городецкий, Д.Е.Мёрш, С.В.Поляков, В.И.Коноводченко, И.Н.Ахвердов, А.Е.Кузьмичев, А.Б.Голышев, А.В.Харченко, А.А.Адаменков, Я.Г.Сунгатуллин, Г.Г.Шорохов, В.П.Полищук, В.Г.Евстифеев, Г.Н.Запутин, В.Г.Кваша, В.А.Гутковский, В.Ш.Фатхуллин, В.С.Еськов, А.А.Оатул, А.В.Яшин, С.Н.Медведев, Г.С.Валеев, Н.Г.Мартынова, С.А.Корейба, И.Н.Коровин, Д.А.Лазовский, А.П.Васильев, А.Н.Mattock, Р.Н.Каар, J.C.Saemann, G.W.Washa, K.Furtak и многих других. Результаты этих исследований нашли отражение в рекомендациях по проектированию сборно-монолитных конструкций.

При эксплуатации железобетонные конструкции, наряду со статическими нагрузками, подвергаются и циклическим нагружениям. Поэтому возникает необходимость оценки выносливости конструкции. Проблема оценки выносливости контактных швов достаточно сложная т.к. при этом необходимо учитывать влияние виброползучести бетона, непрерывное изменение напряженно-деформированного состояния, как в наклонном сечении, так и в самом контакте,

сложный характер перераспределения усилий между арматурой и бетоном в процессе нагружения.

Изучению работы сборно-монолитных конструкций при циклическом нагружении посвящены работы А.П.Кириллова, И.Т.Мирсаяпова, И.Б.Соколова, А.В.Харченко, Г.Г.Шорохова, Ил.Т.Мирсаяпова, Ю.Н.Волкова, А.Н.Mattock, Р.Н.Кааг и др.

Настоящая работа посвящена исследованию прочности и выносливости неармированных и армированных плоских контактных швов сборно-монолитных конструкций в зоне совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил.

При проектировании и расчете контактных швов необходимо решить 2 задачи:

1. Определение несущей способности, т.е. предельной нагрузки, воспринимаемой контактным швом.
2. Определение усилия сдвига, возникающего в контактном шве изгибаемых сборно-монолитных конструкций от действия изгибающего момента и поперечных сил.

Для изучения напряженно-деформированного состояния и несущей способности контактного шва при сдвиге была принята расчетная модель контакта в виде образца, состоящего из двух разнородных бетонов, имеющих единый шов сопряжения, которого пересекает арматурный стержень (рис.1). При действии сдвигающей нагрузки на образец происходит смещение одной части элемента относительно другой. При этом поперечная арматура, пересекающая контактный шов, изгибается и происходит смятие бетона под ней. Исходя из этого, сопротивление контакта сдвигу представляется в виде функции от сопротивления арматуры изгибу, сопротивления смятию бетона под арматурой и сопротивления за счет сил сцепления-зацепления, возникающих на поверхности контактного шва (рис.1).

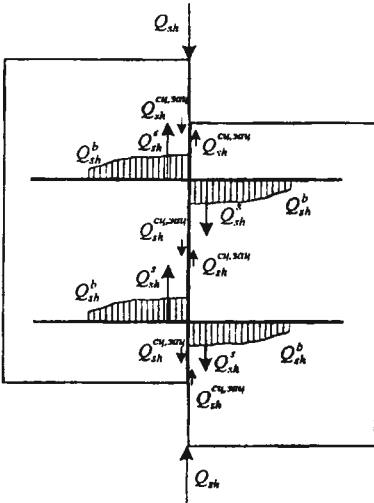
При таком подходе возможны 3 вида разрушения армированного плоского контактного шва:

1. От достижения напряжениями в арматуре предела прочности арматурной стали.
2. От достижения напряжениями в бетоне под арматурой предела прочности



бетона или достижения деформациями бетона предельных значений.

### 3. Одновременное достижение предельных состояний по бетону и арматуре.



Таким образом, несущую способность армированного контакта при статическом нагружении можно представить в виде (рис.1)

$$Q_{sh} = Q_{sh}^{зач} + Q_{sh}^s + Q_{sh}^b. \quad (1)$$

Для оценки доли участия арматуры в восприятии сдвигающих усилий изучена работа арматурного стержня в бетонном массиве. Для этого арматура, пересекающая контактный шов, рассматривается как полубесконечная балка на упругом основании, нагруженная поперечной силой на конце (рис.2). При этом распределение напряжений

Рис.1. Расчетная модель контактного шва в бетоне под арматурным стержнем, и в направлении приложения нагрузки, и вдоль стержня имеет неравномерный характер.

Для определения закона распределения напряжений в бетоне под арматурным стержнем в направлении приложения нагрузки решена задача Буссинеска для полуплоскости. Закон распределения напряжений вдоль стержня определен из решения задачи Б.Н.Жемочкина для балки на упругом основании (рис.2). При этом особенно важными являются упругие свойства основания. Одним из показателей этих свойств является коэффициент постели основания. В данной работе, в отличие от классического решения Б.Н.Жемочкина, для учета физической нелинейности бетона определен переменный коэффициент постели, который выражен в следующем виде:

$$k = \frac{E_b}{d_s \int \frac{dr}{d_s r (\tilde{v} \pm (\nu_0 - \tilde{v}) \sqrt{1 - \omega_{1m} \cdot \eta_b - \omega_{2m} \cdot \eta_b^2})}} = \frac{E_b}{d_s \int \frac{dr}{d_s r \nu_b}}. \quad (2)$$

Из решения задачи о полубесконечной балке на упругом основании можно видеть, что с удалением от точки приложения поперечной силы напряжения в бетоне под арматурой постепенно уменьшаются, и на некотором расстоянии  $l_x$ , рав-

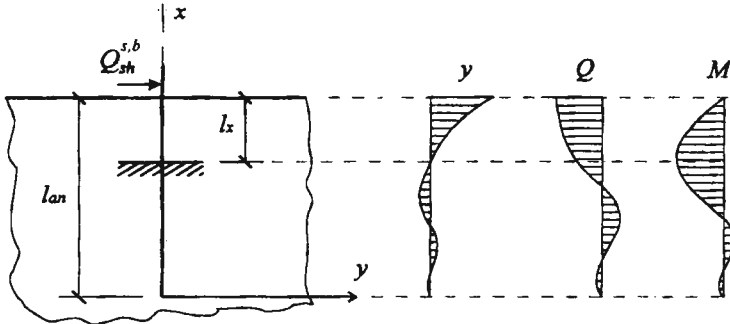


Рис. 2. Эпюры прогибов, поперечных сил и моментов в арматурном стержне

ном  $l_x = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{4E_s I_s}{k \cdot d_s}}$  обращаются в ноль, а эта точка нулевых напряжений называется условной заделкой стержня.

Максимальный изгибающий момент, а, следовательно, и максимальные напряжения в арматуре возникают в условной заделке. Напряжения в арматуре связаны с деформациями смятия бетона, поэтому их можно определять исходя из уравнений кривизны и прогиба оси стержня, принимая, что прогиб арматуры равен деформациям смятия бетона  $f_s = \Delta_b$ . При совместном решении этих двух уравнений получена формула для определения относительных деформаций изгиба арматуры в зависимости от ее прогиба

$$\varepsilon_s = \frac{f_s d_s}{2S \cdot l_x^2}. \quad (3)$$

При выполнении условия  $\varepsilon_s \leq \varepsilon_{shy}$  напряжения, соответствующие этим деформациям, определяются по закону Гука, а в противном случае – по диаграмме деформирования арматуры.

Нагрузка, воспринимаемая арматурным стержнем, определяется по формуле:

$$Q_{sh}^s = \frac{\sigma_s W_s \beta_s}{l_x}. \quad (4)$$

Как уже было отмечено, в восприятии сдвигающих усилий участвует и бетон под арматурой. При расчете принимается, что в восприятии сдвигающих усилий участвует только зона, называемая зоной активного деформирования бетона. В упругой стадии работы бетона эпюра отпора основания близка к треугольной. При увеличении нагрузки напряжения у поверхности контакта возрастают, эпюра

отпора искривляется и при дальнейшем увеличении нагрузки принимает вид схожий с диаграммой деформирования бетона. Разрушение бетонного основания происходит при достижении деформациями бетона предельного значения  $\varepsilon_{bu}$  (рис.3).

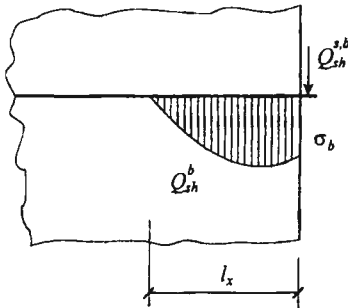


Рис.3. Напряжения в бетоне вдоль арматурного стержня в предельном состоянии

При таком подходе усилие, воспринимаемое бетоном под арматурой, представится как

$$Q_{sh}^b = \sigma_b \cdot d_s \cdot l_x \cdot \omega_b. \quad (5)$$

Значительную часть усилия сдвига воспринимают силы сцепления-зацепления по поверхности сопряжения двух бетонов.

Сопротивление неармированного контакта за счет сил сцепления связывают с прочностью бетона на растяжение

$$R_{sh}^{cy} = k_{cy} R_{bt}. \quad (6)$$

В армированных контактных швах присутствуют, и силы сцепления, и силы механического зацепления. Поэтому, даже после нарушения сцепления, контактный шов продолжает воспринимать нагрузку благодаря силам зацепления.

Силы зацепления связаны с прочностью бетона на сжатие

$$R_{sh}^{zay} = k_{zay} R_b. \quad (7)$$

Тогда нагрузку, воспринимаемую силами сцепления или зацепления, можно определять по зависимостям:

$$Q_{sh}^{cy} = k_{cy} R_{bt} b_{sh} l_{sh}; \quad Q_{sh}^{zay} = k_{zay} R_b b_{sh} l_{sh}. \quad (8) - (9)$$

При циклическом нагружении модель расчета несущей способности контактных швов принята такая же, как и для статического нагружения.

Сопротивление армированного контакта сдвигу при циклическом нагружении, аналогично статическому, можно представить в виде функции:

$$R_{sh}(N) = f(R_{cy}(N), R_{zay}(N), R_{b,rep}, R_{s,rep}). \quad (10)$$

Для оценки выносливости контактных швов сборно-монолитных элементов необходимо определить напряжения в поперечной арматуре и бетоне под ней, возникающие от приложенных нагрузок.

При расчете на циклическую нагрузку рассматриваются начальная и теку-

шая стадии работы конструкции. Текущее напряженно-деформированное состояние складывается из начального и дополнительного напряженно-деформированного состояний. В связи с тем, что начальное напряженно-деформированное состояние аналогично статическому нагружению, начальная несущая способность контакта определяется на основе формул, полученных для статического нагружения. В начале нагружения контактный шов является более жестким и допускает лишь незначительные сдвиги, следовательно, и напряжения в бетоне и арматуре небольшие. Дальнейшее действие циклической нагрузки приводит к снижению жесткостных характеристик контактного шва и, как следствие, увеличению прогиба арматуры и деформаций смятия бетона под ней.

Действие многократно повторных нагрузок сопровождается возникновением и развитием деформаций виброползучести бетона под арматурным стержнем. При приложении нагрузки на арматурный стержень происходит изгиб арматуры и смятие бетона под ней. В этой стадии возможны 2 варианта совместного деформирования арматуры и бетона:

1. Сцепление арматуры с бетоном не нарушается.
2. Сцепление арматуры с бетоном нарушается.

В первом случае арматура и бетон работают совместно. После устранения или уменьшения внешней нагрузки арматура стремится занять свое исходное положение, но из-за наличия сцепления между арматурой и бетоном этому препятствуют необратимые пластические деформации бетона. В результате в арматуре появляются остаточные сжимающие и растягивающие, а в бетоне под ней растягивающие напряжения (рис.4).

При повторном нагружении происходит увеличение пластических деформаций бетона, т.е. идет накопление пластических деформаций. Поэтому при наличии сцепления между арматурой и бетоном из-за остаточных растягивающих напряжений с каждым циклом происходит разгрузка бетона. В арматуре же, наоборот, при каждом нагружении амплитуда прогиба стержня возрастает, и, как следствие, увеличиваются напряжения в ней.

После определенного количества циклов нагружения напряжения в арматуре могут достичь предела текучести. При этом до достижения деформациями, так называемой, “зоны упрочнения” диаграммы деформирования стали рост напряжений

от цикла к циклу приостановится, и будет наблюдаться лишь накопление пластических деформаций.

Остаточные напряжения в бетоне и арматуре контактного шва определяются по выражениям:

$$\sigma_s^{ост}(t) = \frac{\varepsilon_{pl}^b(N) \cdot d_s^2 E_s(t) (\ln c_1 - \ln d_s)}{2S[l_x(t)]^2}; \quad (11)$$

$$\sigma_b^{ост}(t) = \frac{3\pi\varepsilon_{pl}^b(N) \cdot d_s^4 E_s(t) \cdot (\ln c_1 - \ln d_s)}{64 \cdot S \cdot [l_x(t)]^4} \leq R_{bt,rep}, \quad (12)$$

где  $E_s(t)$  — модуль деформации стали.

Во втором случае, при нарушении сцепления между арматурой и бетоном, после устранения внешней нагрузки арматура работает отдельно от бетона. При упругой работе она занимает исходное положение, а остаточные напряжения при этом не возникают.

Бетон под арматурой, также как и в первом случае, в результате необратимого пластического деформирования не может полностью восстановить свой исходный объем, а восстанавливает только частично, за счет упругих деформаций. При этом накопление остаточных напряжений также не наблюдается.

Увеличение усилия сдвига по контакту и уменьшение сил сцепления-зацепления под действием циклического нагружения приводят к увеличению уси-

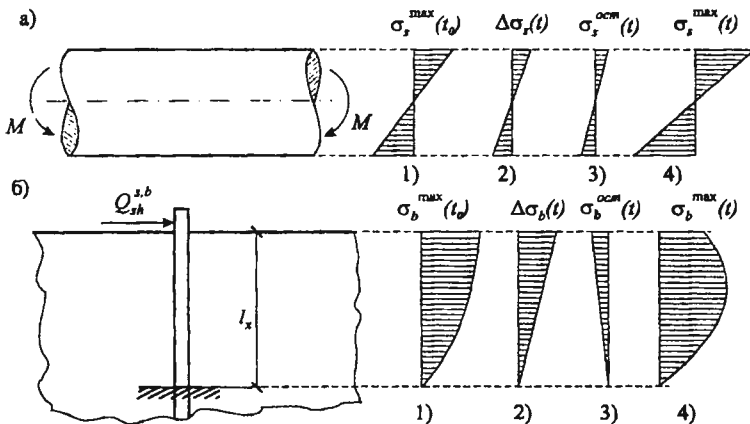


Рис. 4. Накопление напряжений в арматуре (а) и в бетоне (б) контактного шва  
1) начальные напряжения; 2) дополнительные напряжения от увеличения нагрузки, передающейся на арматурный стержень; 3) остаточные напряжения; 4) текущие напряжения

лия, передающегося на арматурный стержень, вследствие чего появляются дополнительные напряжения в бетоне и арматуре  $\Delta\sigma_b(t)$  и  $\Delta\sigma_s(t)$  (рис.4).

Текущие напряжения в арматуре и бетоне контакта определяются суммированием начальных, дополнительных и остаточных напряжений (рис.4)

$$\sigma_b^{\max}(t) = \sigma_b^{\max}(t_0) + \Delta\sigma_b(t) - \sigma_b^{\text{ост}}(t); \quad (13)$$

$$\sigma_s^{\max}(t) = \sigma_s^{\max}(t_0) + \Delta\sigma_s(t) + \sigma_s^{\text{ост}}(t). \quad (14)$$

Исходя из найденных напряжений, определяются измененные коэффициенты асимметрии цикла для арматуры контактного шва и бетона под ней. Изменение коэффициентов асимметрии цикла приводит к изменению пределов выносливости бетона и арматуры. Поэтому при определении несущей способности контактного шва в условиях циклического нагружения необходимо определить пределы выносливости арматурного стержня и бетона, по ним предельные усилия, воспринимаемые каждым из них

$$Q_{sh}^s(t) = \frac{R_{s,rep} W_x \beta_s}{l_x(t)}, \quad Q_{sh}^b(t) = R_{b,rep} \cdot d_s \cdot l_x(t) \cdot \omega_b, \quad (15) - (16)$$

далее, силами зацепления  $Q_{sh}^{\text{зач}}(t)$  и общее усилие, воспринимаемое контактом

$$Q_{sh}(t) = Q_{sh}^{\text{зач}}(t) + Q_{sh}^s(t) + Q_{sh}^b(t). \quad (17)$$

Второй основной задачей при расчете контактных швов сборно-монолитных конструкций является **определение усилия сдвига**, возникающего в контактном шве изгибаемых сборно-монолитных конструкций от действия изгибающего мо-

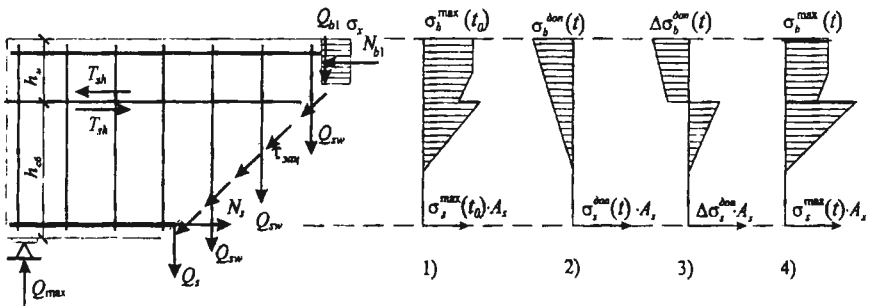


Рис. 5. Расчетная схема приопорного узла сборно-монолитного изгибаемого элемента и напряженное состояние в нормальном сечении конструкции при многократно повторных нагрузках.  
1) эпюра начальных напряжений; 2) эпюра дополнительных напряжений из-за виброползучести приведенного бетона; 3) эпюра дополнительных напряжений из-за разности деформаций виброползучести сборного и монолитного бетонов; 4) эпюра текущих напряжений

мента и поперечных сил.

Экспериментальные исследования, проведенные разными авторами, показывают, что разрушение контактных швов сборно-монолитных изгибаемых конструкций происходит в приопорном участке, отсеченном магистральной наклонной трещиной. Поэтому сдвигающее усилие, соответствующее началу нагружения, наиболее правильно определять исходя из условий равновесия этого приопорного узла. При статическом нагружении определение напряжений и усилий в наклонном сечении сборно-монолитного железобетонного элемента производится на основе двухблочной модели, предложенной А.С.Залесовым и И.А.Титовым, как для цельного сечения. Для этого сборный и монолитный бетоны приводятся к одному эквивалентному по прочности бетону.

Усилие сдвига при статическом нагружении, при условии жесткого соединения сборного и монолитного частей, в зависимости от расположения контактного шва по высоте балки, определяется, исходя из условий равновесия, по двум разным формулам:

для схемы рис.6,а по формуле: 
$$T_{sh} = N_{b1} = \sigma_x b \cdot \min \{x, h_{\text{мон}}\}; \quad (18)$$

для схемы рис.6,б 
$$T_{sh} = N_s = \sigma_s A_s. \quad (19)$$

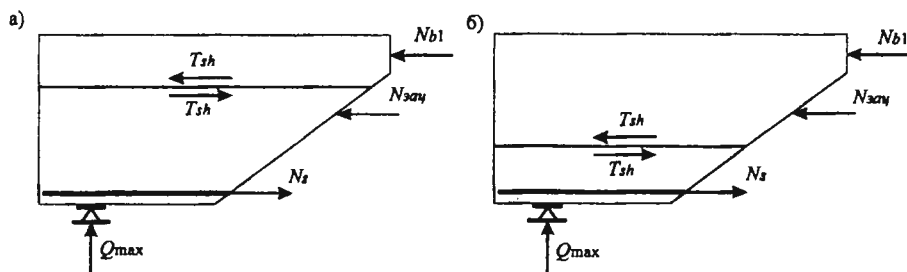


Рис. 6. Расчетная схема усилий в приопорной зоне сборно-монолитной балки при определении усилий сдвига.

Напряженно-деформированное состояние в нормальном и наклонном сечениях элемента, кроме прочностных и деформативных свойств материалов, зависит также и от степени совместного деформирования сборного и монолитного бетонов в едином сечении, т.е. от степени податливости соединения двух бетонов на уровне плоскости сопряжения. При увеличении податливости соединения увеличиваются напряжения в сборном и монолитном бетонах, причем сдвигающее усилие в контактном шве, наоборот, уменьшается.

Влияние податливости соединения отражается и на характере распределения погонных усилий сдвига по контакту. Практически во всех известных работах погонные усилия сдвига принимаются равномерно распределенными по длине контактного шва, что не согласуется с результатами экспериментальных исследований.

Для учета влияния податливости соединения использована теория составных стержней А.Р.Ржаницына. Сборно-монолитная балка рассматривается как стержень, составленный из двух брусев, расположенных на расстоянии  $w$  друг от друга и имеющий жесткие поперечные связи.

Из решения дифференциального уравнения шва составного стержня

$$T''/E_{sh} = \gamma \cdot T + \Delta \quad (20)$$

получена зависимость, учитывающая влияние податливости соединения на величину общего усилия сдвига в виде

$$T_{sh}^{nod} = T_{sh} \left[ \operatorname{ch} \lambda \left( \frac{L}{2} - c_0 \right) \cdot \operatorname{sh} \lambda c_0 / \left( \lambda c_0 \cdot \operatorname{ch} \frac{\lambda L}{2} - 1 \right) \right], \quad (21)$$

где  $\lambda$  – величина, равная  $\lambda = \sqrt{E_{sh} \cdot \gamma}$ ;  $L$  – пролет балки;

$$\gamma = \frac{1}{E_b^{мон} b h_m} + \frac{1}{E_{red} A_{red}} + \frac{w^2}{\sum EI}.$$

Одним из основных показателей составных стержней является коэффициент жесткости связей сдвига между двумя составными элементами, который определяется зависимостью между деформациями, возникающими внутри составного стержня, и внутренними усилиями, вызванными в связях этими деформациями. В работе получено выражение для определения коэффициента жесткости контактного шва в виде

$$E_{sh} = \frac{1}{\frac{2w(1+\nu)}{E_b^{мон} b \cdot k_{sh}} + \frac{(T_{sh} - Q_{sh}^{сч, зап}) \cdot (E_b^{сб} + E_b^{мон})}{T_{sh} k \cdot L \cdot m \cdot d_s E_b^{сб}}}. \quad (22)$$

Как известно, в местах опирания балок и приложения внешних нагрузок в контактом шве составляющих бетонов возникают силы прижатия одной части балки к другой, вызывая напряжения обжатия шва. Эти силы способствуют повышению прочности контактного шва на сдвиг, как за счет улучшения условий работы сил сцепления между бетонами, так и за счет вызываемых ими сил трения.



Напряжения обжатия в контактном шве, а, следовательно, и величина силы прижатия – максимальные над опорой, быстро падают в пролете балки. Таким образом, усилие прижатия передается с одного составляющего балки на другой лишь на небольшом участке длины шва. Поэтому силы трения, прямо пропорциональ-

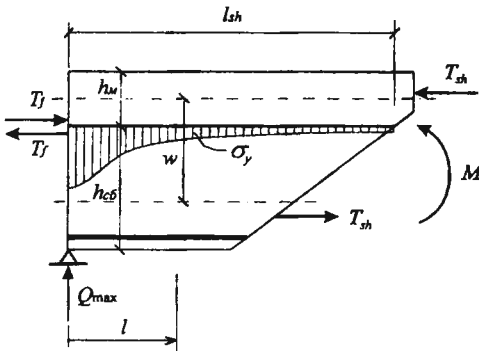


Рис. 7. Расчетная модель приопорного узла с податливым контактным швом и эпюра напряжений обжатия

ные давлению одной части балки на другую, сосредоточены в точках приложения опорных реакций, т.е. по торцам балки (рис.7).

При определении характера распределения погонных усилий сдвига по контактному шву с учетом сил трения рассматривается приопорная часть балки, отсеченная наклонной трещиной. Расчетная модель принята в виде, показанном на рис.7.

Из решения дифференциального уравнения (20) получена теоретическая зависимость, позволяющая оценивать погонные усилия сдвига в любой точке контактного шва приопорной зоны с учетом влияния сил трения

$$\tau_{sh} = T_{sh}^{pod} \frac{\lambda \cdot \operatorname{ch} \lambda l}{\operatorname{sh} \lambda l_{sh}} + \frac{\Delta}{\gamma} \left( \lambda l_{sh} \frac{\operatorname{ch} \lambda l}{\operatorname{sh} \lambda l_{sh}} - 1 \right) - T_f \lambda \frac{\operatorname{ch} \lambda (l_{sh} - l)}{\operatorname{sh} \lambda l_{sh}}. \quad (23)$$

Правую часть выражения (23) условно можно разделить на 3 части. Первое слагаемое характеризует влияние усилия сдвига  $T_{sh}$  на характер распределения погонных усилий сдвига по контакту, второе – влияние изгибающего момента  $M(l)$ , третье – влияние сил трения. Влияние этих усилий на характер распределения погонных усилий изменяется в зависимости от геометрических, прочностных и деформативных характеристик приопорного участка балки и контактного шва. Результаты вычислений, полученные с использованием данной формулы, показывают, что из всех перечисленных факторов на характер распределения наибольшее влияние оказывают длина и жесткость шва. С уменьшением длины шва снижается влияние изгибающего момента, и погонные усилия сосредотачиваются в точке пересечения контактного шва наклонной трещиной (рис.8,а). Влияние изгибающего момента начинает проявляться при  $l_{sh}/h_0 > 1$ , вызывая изменение эпюры погон-

ных усилий сдвига (рис.8,б), которые при этом распределяются по длине шва более равномерно.

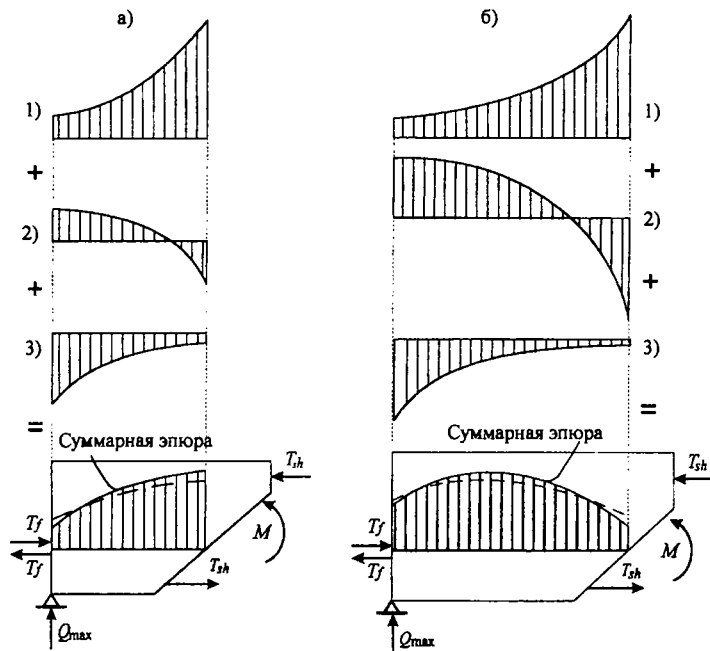


Рис.8. Влияние силовых факторов на распределение погонных усилий сдвига  $\tau_{sh}$  по контакту в зависимости от отношения длины шва к высоте балки: а) при  $l_{sh}/h_0 < 1$ ; б) при  $l_{sh}/h_0 > 1$ ; 1) эпюра погонных усилий сдвига, возникающих от действия сосредоточенного усилия сдвига  $T_{sh}$ ; 2) то же, от действия изгибающего момента  $M$ ; 3) то же, от действия сил трения  $T_f$ .

При расчете на **циклическую нагрузку**, как отмечалось, рассматриваются две стадии работы конструкции: начальная и текущая. Начальное напряженно-деформированное состояние аналогично статическому нагружению, поэтому начальное усилие сдвига, его распределение по контактному шву определяются на основе формул, полученных для статического нагружения

$$T_{sh}(t_0) = N_{b1, \max} = \sigma_{x, \max} b \cdot x; \quad T_{sh}(t_0) = N_{s, \max} = \sigma_{s, \max} A_s. \quad (18^* - 19^*)$$

Текущее напряженно-деформированное состояние складывается из начального и дополнительного напряженно-деформированного состояний.

Действие циклических нагрузок приводит к изменению напряженно-деформированного состояния конструкции в целом. Под действием циклического нагружения происходит снижение прочностных характеристик бетона и арматуры

и накопление деформаций виброползучести, как в самом контакте, так и в нормальном и наклонном сечениях элемента (рис.5).

В сборно-монолитных элементах, в отличие от сплошных конструкций, возникают также и остаточные напряжения из-за разности деформаций виброползучести сборного и монолитного бетонов.

Накопление деформаций виброползучести в нормальном и наклонном сечениях конструкции приводит к увеличению усилия сдвига по контактному шву. При определении текущего усилия сдвига учитываются дополнительные напряжения из-за виброползучести эквивалентного бетона  $\sigma_{x1,дон}$ ,  $\sigma_{x2,дон}$ ,  $\sigma_{s1,дон}$  и из-за разности деформаций виброползучести сборного и монолитного бетонов  $\Delta\sigma_{x,мон}^B$ ,  $\Delta\sigma_{s1,дон}$ . Текущее усилие сдвига, в зависимости от расположения контактного шва по высоте балки, определяется по формулам (см. рис.5, 6 и формулы 18 – 19):

$$T_{sh}(t) = \left[ \sigma_{x, \max}(t_0) - 0,5\sigma_{x1,дон} \left( 2 - \frac{x}{x_0} \right) - 0,5\sigma_{x2,дон} - 0,5\Delta\sigma_{x,мон}^B \left( 2 - \frac{x}{x_0} \right) \right] \cdot b \cdot \min\{x, h_{мон}\} \quad (24)$$

или

$$T_{sh}(t) = (\sigma_{x, \max}(t_0) + \sigma_{s,дон} + \Delta\sigma_{s,дон}) A_s. \quad (25)$$

Таким образом, из-за накопления в наклонном сечении дополнительных напряжений происходит увеличение сдвигающего усилия по контакту, однако под влиянием податливости соединения сдвигающее усилие уменьшается (может уменьшаться до 30%).

Окончательное выражение для определения текущего усилия сдвига по контакту с учетом податливости сопряжения, дополнительных напряжений в наклонном сечении и изменения деформативных характеристик бетона и арматуры контакта, в зависимости от расположения шва по высоте балки (рис.6), будет иметь вид:

$$T_{sh}^{pod}(t) = \left[ \sigma_{x, \max}(t_0) - 0,5\sigma_{x1,дон} \left( 2 - \frac{x}{x_0} \right) - 0,5\sigma_{x2,дон} - 0,5\Delta\sigma_{x,мон}^B \left( 2 - \frac{x}{x_0} \right) \right] \times \\ \times \left\{ \operatorname{ch} \left[ \lambda(t) \left( \frac{L}{2} - c_0 \right) \right] \cdot \operatorname{sh}[\lambda(t) c_0] / \left( \lambda(t) c_0 \cdot \operatorname{ch} \frac{\lambda(t) L}{2} \right) - 1 \right\} \cdot b \cdot \min\{x, h_{мон}\} \quad (26)$$

или

$$T_{sh}^{nod}(t) = [\sigma_{s,max}(t_0) + \sigma_{s,дон} + \Delta\sigma_{s,дон}] \left\{ \operatorname{ch} \left[ \lambda(t) \left( \frac{L}{2} - c_0 \right) \right] \cdot \operatorname{sh} [\lambda(t) c_0] / \left( \lambda(t) c_0 \cdot \operatorname{ch} \frac{\lambda(t) L}{2} \right) - 1 \right\} A_s, \quad (27)$$

$$\text{где } \lambda(t) = \sqrt{\frac{\gamma(t)}{\frac{2w(1+\nu)}{E_b^{мон}(t) b h_{мон}} + \frac{[T_{sh}(t) - Q_{sh}^{сч,зач}(t)] \cdot [E_b^{сб}(t) + E_b^{мон}(t)] \cdot l_{sh}}{T_{sh}(t) \cdot k(t) \cdot L \cdot n_{sw} \cdot d_s E_b^{сб}(t)}}}};$$

$$\gamma(t) = \frac{1}{E_b^{мон}(t) b h_{мон}} + \frac{1}{E_{ред}(t) A_{ред}(t)} + \frac{w^2}{\sum E(t) I}.$$

Текущие погонные усилия сдвига по длине шва с учетом сил трения определяются на основе формулы (23) (на рис.8 пунктирной линией показано распределение текущих погонных усилий сдвига)

$$\tau_{sh}^{nod}(t) = T_{sh}^{nod}(t) \frac{\lambda(t) \cdot \operatorname{ch} [\lambda(t) l]}{\operatorname{sh} [\lambda(t) l_{sh}]} + \frac{\Delta(t)}{\gamma(t)} \left( \lambda(t) l_{sh} \frac{\operatorname{ch} [\lambda(t) l]}{\operatorname{sh} [\lambda(t) l_{sh}]} - 1 \right) - T_f \lambda(t) \frac{\operatorname{ch} [\lambda(t) (l_{sh} - t)]}{\operatorname{sh} [\lambda(t) l_{sh}]}.$$

Выносливость контакта проверяется по условиям:

$$T_{sh}^{nod}(t) \leq Q_{sh}(t) \quad \text{и} \quad \tau_{sh}^{nod}(t) \leq q_{sh}(t), \quad (26) - (27)$$

где  $Q_{sh}(t)$  – усилие, воспринимаемое контактом, определяется по формуле (17);

$q_{sh}(t) = Q_{sh}(t)/l_{sh}$  – погонная несущая способность контакта.

Проверка точности предлагаемого метода расчета проведена путем сравнения теоретических результатов с данными экспериментальных исследований, полученных разными авторами. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало достаточно хорошую сходимость результатов.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В действующих нормах проектирования железобетонных конструкций (СНиП 2.03.01-84\*) расчет контактных швов сборно-монолитных конструкций на статическое нагружение производится в основном по эмпирическим формулам, а расчет выносливости контакта производится как при статическом нагружении, путем уменьшения расчетных сопротивлений материалов, что приводит к искажению картины напряженно-деформированного состояния сборно-монолитных элементов при статических и циклических нагружениях и, как следствие, к снижению надежности и экономичности проектных решений (расчет прочности контакта по

методике действующих норм проектирования при статическом нагружении приводит к погрешностям до 40%, при циклическом нагружении – до 50%). В связи с этим назрела необходимость в разработке новых методов расчета прочности и выносливости контактных швов сборно-монолитных конструкций с учетом физической нелинейности бетона и стали, податливости соединения разных слоев бетонов и неравномерности распределения сдвигающих усилий.

2. Разработан метод расчета прочности на сдвиг армированных плоских контактных швов сборно-монолитных конструкций при однократном статическом нагружении, основанный на реальном напряженно-деформированном состоянии, возникающем при действии сдвигающей нагрузки. Впервые аналитически описана функция сопротивления контактных швов сдвигу за счет сил сцепления-зацепления, сопротивления арматуры, пересекающей контактный шов, изгибу и сопротивления бетона смятию под арматурой. На этой основе за критерий разрушения контактного шва принято достижение предельных состояний в арматуре, пересекающей контактный шов, от изгиба, или в бетоне под арматурой от смятия, или одновременное достижение предельных состояний в обоих компонентах. Установлена доля влияния каждого компонента на несущую способность контакта.

Впервые, при определении несущей способности поперечной арматуры, пересекающей контакт, и бетона под ней, получена аналитическая функция изменения коэффициента постели бетонного основания под арматурой в зависимости от уровня напряжений в бетоне.

Предложенный метод расчета позволяет достоверно оценить напряженно-деформированное состояние и прочность контактных швов сборно-монолитных элементов при статическом нагружении (среднее математическое ожидание – 0,988; коэффициент вариации – 0,102).

3. Впервые разработана аналитическая методика расчета выносливости на сдвиг контактных швов сборно-монолитных конструкций на основе единой для статического и циклического нагружений расчетной модели с учетом изменения напряженно-деформированного состояния, прочностных и деформативных характеристик материалов в процессе циклического нагружения. Установлено, что жесткость контактного шва на сдвиг, напряжения, коэффициенты асимметрии цикла

в бетоне и арматуре контакта непрерывно изменяются в процессе циклического нагружения вследствие проявления виброползучести бетона под поперечной арматурой контакта в связанных условиях и уменьшения прочности бетона. В диссертации получены функции для определения начальных и дополнительных напряжений в компонентах контактного шва, жесткостных характеристик сопряжения до и после нарушения сплошности контакта, корректно описывающие закономерности, наблюдаемые в экспериментах.

4. Впервые получены аналитические зависимости для описания изменения сдвигающих усилий в плоскости контактных швов изгибаемых сборно-монолитных конструкций в зоне совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил в условиях циклического нагружения. Установлено, что на величину сдвигающих усилий и несущей способности контакта влияют:

- силы прижатия одной части балки к другой, возникающие в местах приложения внешних нагрузок и опорных реакций, способствующие повышению прочности контактного шва на сдвиг, как за счет улучшения условий работы сил сцепления между бетонами, так и за счет вызываемых ими сил трения, которые сосредотачиваются в местах приложения нагрузки и постепенно уменьшаются с удалением от этих точек;
- степень совместного деформирования сборного и монолитного бетонов в едином сечении, т.е. степень податливости соединения двух бетонов на уровне плоскости сопряжения, при увеличении которой увеличиваются напряжения в сборном и монолитном бетонах, причем сдвигающее усилие в контактном шве наоборот уменьшается;
- неравномерность распределения погонных усилий сдвига и сил трения по контактному шву изгибаемых конструкций, что особенно важно для неармированных контактных швов, т.к. в таких контактах после образования трещины в каком-нибудь участке шва несущая способность этого участка резко снижается (сдвигающие усилия уже воспринимаются только за счет сил трения), что в свою очередь приводит к увеличению погонных усилий сдвига в остальных участках.

5. Разработана методика расчета выносливости на сдвиг контактных швов

изгибаемых сборно-монолитных конструкций в зоне совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил в условиях циклического нагружения, с использованием уравнений равновесия и деформационных зависимостей по наклонному сечению для определения начального усилия сдвига, возникающего в контакте, и с учетом одновременного изменения напряженно-деформированного состояния в компонентах наклонного сечения и контактного шва, прочностных и деформативных свойств материалов в составе конструкции. Впервые в расчетах учитываются влияние податливости сопряжения двух бетонов на величину сдвигающего усилия по контакту, неравномерность распределения погонных усилий сдвига и сил трения, влияние обжатия в шве, возникающего от опорных реакций. В диссертации предложены уравнения функций влияния податливости соединения на усилие сдвига по контакту для учета неравномерности распределения погонных усилий сдвига и сил трения по контактному шву.

Предложенный метод расчета позволяет достоверно оценить напряженно-деформированное состояние и выносливость контактных швов сборно-монолитных конструкций при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил на всех стадиях циклического нагружения (среднее математическое ожидание – 1,033; коэффициент вариации – 0,09), что позволяет повысить надежность, а в ряде случаев – расчетную несущую способность, и за счет этого получить более экономичные их конструктивные решения.

6. Результаты расчета по предложенным методам хорошо согласуются с существующими экспериментальными данными, полученными разными авторами при испытании сборно-монолитных образцов. Их достоверность и надежность подтверждается данными испытаний 112 образцов сборно-монолитных элементов, отличающихся размерами, прочностью бетона, содержанием продольной и поперечной арматуры, расчетной схемой и режимом нагружения.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Мирсяпов И.Т., Хасанов Р.Р. Выносливость контактного шва сборно-монолитных железобетонных конструкций на сдвиг // Проблемы реконструкции и возрождения исторических городов / Российский научно-практический семинар / Сборник материалов. – Казань, КГАСА, 1999. – С.134-143.

2. **Мирсаяпов И.Т., Хасанов Р.Р.** Сопротивление контактного шва между сборным и монолитным бетонами сдвигу при циклическом нагружении. Материалы 50-й республиканской научной конференции. Сборник научных трудов аспирантов. – Казань, КГАСА, 1999. – С.107-110.
3. **Мирсаяпов И.Т., Хасанов Р.Р.** Выносливость контактного шва сборно-монолитных железобетонных изгибаемых конструкций на сдвиг. Материалы 51-й республиканской научной конференции. Сборник научных трудов аспирантов. – Казань, КГАСА, 2000. – С.82-86.
4. **Мирсаяпов И.Т., Хасанов Р.Р.** Жыелма-монолит тимербетон конструкциялар-нен контакт жойларенен шудырып кучеругэ чыдамлыгы (Выносливость контактного шва сборно-монолитных железобетонных конструкций на сдвиг) (на тат. языке) // Наука и язык. № 2. – Казань, 1999. – С. 60-65.

#### Корректурa автора

Подписано в печать 28.10.95	Формат 60×84/16	
Заказ 124	Печать RISO	Объем 1,0 усл.-печ.л.
Тираж 100 экз.	Бумага тип. № 1	Учетн.-изд.л. 1,0

Печатно-множительный отдел КГАСА

Лицензия № 03/380 от 16.10.95 г.

420043, Казань, Зеленая, 1